



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin özelliklerinin incelenmesi

Investigation of properties of graphene reinforced epoxy nanocomposites

Yazarlar (Authors): Hazal YILMAZ DOĞAN¹, Yasin ALTIN², Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU³

ORCID¹: 0000-0002-4101-6960

ORCID²: 0000-0002-8554-3025

ORCID³: 0000-0003-2960-5188

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yılmaz Dogan, H., Altın Y. ve Çelik Bedeloğlu A., "Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin özelliklerinin incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1719-1727, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.689424

Grafen Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Properties of Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Grafen/epoksi nanokompozit filmler başarıyla üretilmiştir./ Graphene / epoxy nanocomposite films have been successfully produced
- ❖ %1'lik grafen katkısında, maksimum gerilme değeri, ~20 MPa olarak elde edilmiştir. / The maximum tensile value of graphene/epoxy nanocomposites was obtained as ~ 20 MPa with 1% graphene addition.
- ❖ Hacimsel direnç %28,2 ve yüzeyel direnç %9,7 oranında azalmıştır./ Reduction in the volumetric resistance and surface resistance was obtained as 28.2% and 9.7%, respectively.
- ❖ Grafenin, nanokompozitlerin termal bozunmasını yavaşlattığı sonucunu desteklemiştir./ The conclusion that graphene slows down the thermal degradation of nanocomposites is supported.
- ❖ Elektriksel iletkenlik, gerilme değerleri ve ışık absorpsiyonunda artış sağlanmıştır. /An increase in the electrical conductivity, tensile values and light absorption of nanocomposite films was obtained.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş epoksi kompozitler elde etmek amacıyla grafen %0,05, %0,1, %0,25, %0,5 ve %1 oranlarında epoksi içerisine eklenmiş ve nanokompozit filmler üretilmiştir ve özellikleri incelenmiştir./ Graphene was added to the epoxy at certain rates which 0.05%, 0.1%, 0.25%, 0.5% and 1% to obtain nanocomposites and properties of the films were investigated.

Amaç (Aim)

Elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş epoksi kompozitler elde etmek amacıyla grafen içeren nanokompozit filmler üretilmiştir. / To obtain improved electrical conductivity and mechanical properties, nanocomposites with graphene were produced.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Grafen tozu epoksi içerisinde ultrasonik homojenizatör yardımıyla dağıtılmıştır. Ardından, sertleştiricisi ilave edildikten sonra alüminyum kaplara dökülmüş ve nanokompozit filmler üretilmiştir. / Firstly, graphene powder was dispersed in epoxy by means of an ultrasonic homogenizer. Then, after the hardener was added, it was poured in to aluminum containers and nanocomposite films were produced.

Özgünlük (Originality)

Geniş konsantrasyon aralığında üretilen grafen katkılı epoksi polimer kompozitlerin özelliklerinin ayrıntılı şekilde incelenmesi bu çalışmanın özgün yanıdır./ A detailed examination of the properties of graphene-added epoxy polymer composites produced in a wide concentration range is the unique aspect of this study.

Bulgular (Findings)

%1'lik grafen katkısı, grafen/epoksi nanokompozitlerin maksimum gerilme değerini, katkısız epoksiye göre %33,84 oranında arttırarak ~20 MPa' çıkartmıştır, hacimsel direnç değerinde %28,2 ve yüzeyel direncinde %9,7'lik bir azalmaya sebep olmuştur. / The maximum tensile value of graphene/epoxy nanocomposites was obtained as ~20 MPa by increasing 33.84% compared to neat epoxy-based nanocomposites with 1% graphene addition reducing the volumetric resistance and surface resistance as 28.2% and 9.7%, respectively.

Sonuç (Conclusion)

Epoksiye ilave edilen grafen miktarı arttıkça, nanokompozit filmlerin elektriksel iletkenliğinin, gerilme değerlerinin ve ışık absorpsiyonunun arttığı gözlenmiştir. / It has been observed that as the amount of graphene added to the epoxy increases, the electrical conductivity, tensile values and light absorption of nanocomposite films increase.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Grafen Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Hazal YILMAZ DOĞAN*, Yasin ALTIN, Ayşe BEDELOĞLU

Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received :14.02.2020 ; Kabul/Accepted : 22.08.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 08.09.2020)

ÖZ

Son yıllarda, grafen sahip olduğu üstün elektronik, termal ve mekanik özellikler nedeniyle bilim adamları ve sanayinin çok ilgisini çekmiş ve farklı alanlarda ve ileri uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Grafenin çok az miktarda katkı olarak kullanılması ile polimerlere ileri özellikler katması nedeniyle, grafen ve türevleri polimer kompozitler alanında da büyük ilgi uyandırmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, özellikle elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş epoksi kompozitler elde etmek için grafen belirli oranlarda (ağırlıkça %0,05, %0,1, %0,25, %0,5 ve %1) epoksi içerisine eklenmiş ve nanokompozit filmler üretilmiştir. Üretilen nanokompozitlerin özellikleri, fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA), mekanik test, taramalı elektron mikroskobu (SEM), UV-Vis-NIR spektrofotometre ve elektriksel iletkenlik ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, %1 oranında grafen katkısı, epoksi filmlerin hacimsel direnç değerinde %28,2 ve yüzeyel direncinde %9,7'lik bir azalmaya sebep olmuştur. Grafen/epoksi nanokompozitlerin maksimum gerilme değeri, %1'lik grafen katkısında, katkısız epoksiye göre %33,84 oranında artarak ~20 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, epoksiye ilave edilen grafen miktarı arttıkça, nanokompozit filmlerin elektriksel iletkenliğinin, gerilme değerlerinin ve ışık absorpsiyonunun arttığı gözlenmiştir. Elde edilen nanokompozit filmler, sağladığı iyileştirilmiş elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikler sayesinde endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Grafen, nanokompozit, epoksi, kompozit, polimer nanokompozit.

Investigation of Properties Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites

ABSTRACT

In recent years, graphene has attracted the attention of scientists and industry due to its superior electronic, thermal and mechanical properties and has been used in different fields and advanced applications. Graphene and its derivatives have also attracted great interest in the field of polymer composites, since the use of graphene as a small amount of additive brings about advanced properties to the polymers. Therefore, in this study, graphene was added to the epoxy at certain rates (0.05%, 0.1%, 0.25%, 0.5% and 1%) to obtain nanocomposites with improved electrical conductivity and mechanical properties. The properties of obtained nanocomposite films were examined by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), thermogravimetric analysis (TGA), mechanical test, scanning electron microscope (SEM), UV-Vis-NIR spectrophotometer and electrical conductivity measurements. 1% graphene additive caused a 28.2% decrease in the volumetric resistance and 9.7% in the surface resistance of the nanocomposite films. The maximum tensile value of graphene/epoxy nanocomposites was obtained as ~ 20 MPa by increasing 33.84% in 1% graphene additive compared to neat epoxy-based nanocomposites. As a result, it has been observed that as the amount of graphene added to the epoxy increases, the electrical conductivity, tensile values and light absorption of nanocomposite films increase. The nanocomposite films obtained can be used in industrial applications thanks to the improved electrical conductivity and mechanical properties.

Keywords: Graphene, nanocomposite, epoxy, composite, polymer nanocomposite.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, termoset kompozitler, kolay işlenme özellikleri, iyi sürtünme dirençleri ve yüksek işleme sıcaklıklarına sahip olmaları gibi özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamalarında artan kullanıma sahiptirler [1]. Termoset kompozit olarak genellikle epoksi, polyester, fenolik ve poliimid reçineler tercih edilmektedir [2]. Yapıştırıcı, kaplama, laminasyon, kapsülleme, elektronik/elektrik yalıtımı ve kompozit uygulamalar gibi birçok alanda yüksek performanslı bir malzeme olarak kullanılan epoksi reçineler, mükemmel

mekanik özellikleri, düşük maliyeti, kolay işlenmesi, birçok alt tabakaya yapışması, düşük çekme oranı, yüksek elektrik yalıtımı, iyi fizikokimyasal, dielektrik ve yaşlanma özellikleri ile iyi kimyasal dayanım gibi özellikleri sayesinde, geniş bir uygulama alanına sahip termoset matrisler olarak kullanılmaktadır [3-8]. Çapraz bağlı ağ yapılarından dolayı düşük nem emme, yüksek modül ve yüksek sıcaklık performansları özelliklerine sahip olan epoksi reçineler, istenmeyen bir kırılmalık özelliği göstermektedirler [9]. Günümüzde yüksek performansa sahip ileri teknoloji ürünlerin, farklı özellikte nano malzemeler içeren kompozitlerle oluşturulduğu görülmektedir. Özellikle, 2004 yılında keşfedilen grafen, iki boyutlu altıgen kafes şeklinde

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ayse.bedeloglu@btu.edu.tr

düzenlenmiş, benzersiz özellikler sunan bir karbon allotropudur ve diğer nano malzemeler arasında önemli bir yere sahip olmuştur [10, 11]. Grafen üzerine yapılan yoğun çalışmalar sonucunda, Young modülünün (~1000 GPa), kırılma mukavemetinin (~125 GPa), elastisite modülünün (~0.25 TPa), ısı iletkenliğinin (~5000 Wm⁻¹ K⁻¹), yük taşıyıcılarının hareketliliğinin (~200000 cm² V⁻¹ s⁻¹), özgül yüzey alanının (hesaplanan değer, ~2630 m² g⁻¹) ve kuantum Hall etkisinin son derece yüksek değerler gösterdiği bulunmuştur. Grafenin bu üstün özellikleri, güneş hücreleri, sensörler, piller, şeffaf elektrotlar süperkapasitörler ve diğer fonksiyonel nano kompozitler gibi birçok uygulamada tercih edilen bir takviye malzemesi olmasına sebep olmaktadır [12-15].

Polimer matrislerin içerisine çok az miktarda grafen ilavesiyle, sertlik, gerilme mukavemeti, sürtünme, aşınma gibi özelliklerde artış sağlanmış kompozitler elde edilebilmektedir [10]. Ayrıca, grafen takviyeli kompozitlerde, grafenin hacim kesrindeki artış ile Young modülü ve kayma modülünde önemli bir artış gözlenme ve kırılma dayanımı da azalmaktadır [16]. Ancak, polimer kompozitlerde, matris ile grafen arasındaki ara yüzey ilişkisi oldukça zayıftır. Bu nedenle, literatürde, grafenin yukarıda sayılan üstün özelliklerinden dolayı epoksi matrisi içerisine katılması ile ilgili çok fazla deneysel çalışma bulunmaktayken [17-26], bu çalışmaların bir kısmı, grafenin yüzeyinin modifiye edilmesi ile grafen ve epoksi arasındaki ara yüzey enerjisinin artırılmasını ve daha homojen karışımların hazırlanmasını sağlamaya yöneliktir [27]. Kovalent bağlar ile fonksiyonelleştirme, kovalent olmayan fonksiyonelleştirme ve elementel doplama fonksiyonelleştirmede kullanılan temel yöntemlerdir [28]. Duan ve ark., benzil glisidil eterini (BGE) grafen yüzeyini modifiye etmekte kullanmışlardır. Modifiye edilmiş grafen takviyesi ile nanokompozitlerin çekme dayanımı, elastik modülü, depolama modülü ve termal iletkenliği sırasıyla, %15, %32,8, %37 ve %95,7 artış göstermiştir [29]. Wang ve arkadaşları ise, karboksil sonlu bütadien akrilonitril (CTBN) katkı epoksi matris içerisine grafen ilavesi için uygun strateji belirlenmeye çalışılmıştır. İlave edilen grafen boyutu ve miktarının CTBN ile modifiye edilmiş epoksi kompozitlerin kırılma tokluğu, ısı iletkenlik, mekanik ve termo-mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Epoksi reçine içerisine %10 CTBN ve %3 Grafen (5 mm'den büyük) ilavesi ile tokluk değerinin %108, termal iletkenliğin %145 geliştirildiği rapor edilmiştir [30]. Ayrıca, diğer bir çalışmada, grafen yüzeyinin kovalent bağlar ile fonksiyonelleştirilmesi sayesinde dolgunun matris içinde daha iyi dağıldığı gözlemlenmiş, fakat bu durumun, grafen nanopartiküllerin elektriksel özelliklerini olumsuz etkilediği bildirilmiştir [31].

Fonksiyonelleştirme işlemleri, grafenin polimer içerisinde dağılımını iyileştirse de, ek kimyasal madde ve yöntem maliyeti ile grafenin polimer içerisindeki iletkenlik özelliklerini zayıflatması nedeniyle, grafen çoğu zaman yüzey fonksiyonelleştirilmesi uygulanmadan, ultrasonik etki ile polimer içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmaktadır [32-34].

Tüm bu çalışmalar incelendiğinde, geniş konsantrasyon aralığında üretilen grafen katkı epoksi polimer kompozitlerin özelliklerini inceleyen çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, 5 farklı konsantrasyonda (ağırlıkça %0,05-1) grafen takviyeli epoksi reçine kompozitler hazırlanmıştır. Grafen nanoparçacıkları epoksi matris içerisnde, sonikasyon işlemi yani bir prob-tipi ultrasonik homojenleştirici yardımı ile dağıtılmıştır. Hazırlanan katkısız ve bu 5 farklı konsantrasyondaki katkı nanokompozit filmler kimyasal, elektriksel, mekanik, termal, optik ve morfolojik özellikler açısından ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

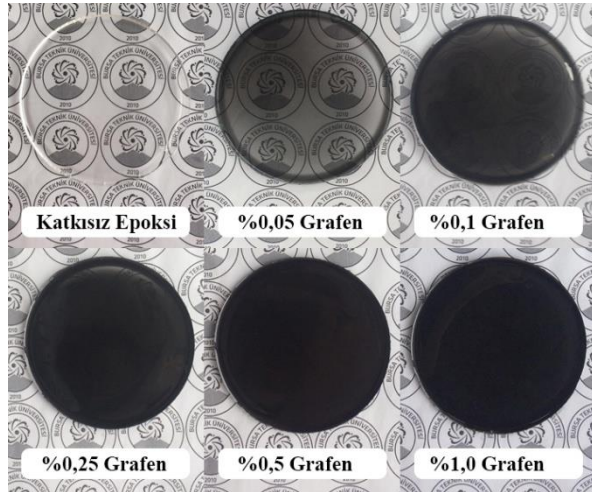
2.1 Malzeme (Material)

Nanokompozitlerin üretilmesi amacıyla, grafen tozu (Grafen Kimyasal Endüstrisi, Türkiye) (elektriksel iletkenliği >10³ S/m ve yüzey alanı > 500 m²/g (BET)), Bisfenol A esaslı epoksi reçine (EP-100, Epakem, İstanbul) (Epoksit ekivalent kütlesi 180-200 g/eq, viskozitesi 700-1000 cps/25°C) ve sertleştirici (385H, Epakem, İstanbul) kullanılmıştır.

2.2 Yöntem (Method)

Grafen takviyeli epoksi nanokompozitler hazırlanırken, ağırlıkça %0,05, 0,1, 0,25, 0,5 ve %1 oranında grafen tozu, ilk olarak epoksiye (24 gr) dahil edilmiştir. Ardından 1,5 saat ultrasonik homojenizatöre konularak homojen bir karışım sağlanmıştır. Grafenin epoksde dağılımı sağlandıktan sonra sertleştiricisi (12 gr) ilave edilmiştir. Bu çözeltideki epoksi ve sertleştirici oranı 2:1 seçilmiştir. Sertleştiricisi ilave edilen santrifüj tüpündeki grafen/epoksi nanokompozit çözeltisi iyice çalkalandıktan sonra, 5 dk ultrasonik banyoya konularak baloncukların giderilmesi sağlanmıştır. Ardından alüminyum kaplara 5 gr karışım ilave edilmiş ve yüzeydeki oluşan baloncuklar şırınga iğnesi yardımıyla patlatılmıştır. Hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığında 1 gün bekletilerek kürlenmesi sağlanmıştır. Ardından, etkili bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, katkısız epoksi nanokompozit film üretilmiştir (Şekil-1).

Üretilen 9 cm çapındaki katkısız ve grafen katkı epoksi nanokompozit filmlerin ortalama inceliği mikrometre ile 0,69 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Görüntüleri (Images of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).

2.3 Karakterizasyon (Characterization)

2.3.1 FT-IR analizleri (FT-IR analysis)

Bu çalışma kapsamında, katkısız epoksi ve grafen/epoksi nanokompozitlerin 400 cm^{-1} ile 4000 cm^{-1} frekans arasında absorbans değerleri ölçülerek Nicolet-IS50 FT-IR spektrofotometre ile FT-IR analizleri yapılmıştır.

2.3.2 Elektriksel özellikler (Electrical properties)

Üretilen epoksi nanokompozitlerinin hacimsel ve yüzeyel direnç ölçümleri (20 mA, 20 V), Keithley 6517B-E cihazına entegre Keithley 8009 test aparatı ile 4 prob tekniğine göre ASTM D-257 standardına uygun olarak yapılmıştır. Her bir numune için 3'er test gerçekleştirilmiştir. Hacimsel ve yüzeyel direncin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$\rho_s = \frac{53,4 V}{I} \Omega \quad (1)$$

$$\rho_v = \rho_s \times t(\text{cm}) \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_v} \quad (3)$$

Burada, yüzey direnci (ρ_s), nanokompozit numunesinin yüzeyine bir voltaj uygulayarak, ortaya çıkan akımı ölçerek ve yukarıdaki denklem (1)'i uygulayarak hesaplanır. ρ_s , nanokompozit numunesinin yüzey direncidir, V uygulanan gerilimdir ve I, elektrometreden okunan akımdır. Hacimsel direnci (ρ_v), belirli bir akım, enine kesitsel bir alandan akarken, belirli bir mesafede ayrılan elektrotlar arasındaki potansiyel bir farkın kaydedilmesiyle ölçülmüştür. Burada, t nanokompozit numunesinin kalınlığı (cm) ve σ nanokompozit numunesinin iletkenliğidir. Hacimsel direnci (ρ_v) ve iletkenlik yukarıda verilen denklemlerle (2) ve (3) hesaplanmaktadır [35].

2.3.3 Termogravimetrik analizler (Thermogravimetric analysis)

Üretilen nanokompozitlerin termal analizleri, TGA (TA Instruments/SDT 650) cihazında gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik tayin için katkısız epoksi ve %1'lik grafen/epoksi numuneleri test edilmiştir. Bu numuneler, 5-10 mg arasında kesilmiştir. Test, 30°C-600 °C arasında 5°C/dak ısıtma hızı ile N_2 atmosferinde; 600°C-900°C arasında O_2 atmosferinde ve son adımda 900°C'de 10 dakika bekleme şeklinde gerçekleştirilmiştir.

2.3.4 Mekanik testler (Mechanical tests)

Bu çalışmada üretilen nanokompozitlerin mekanik özellikleri, mekanik test cihazı (SHIMADZU-AGS-X) çekme testi yapılarak incelenmiştir. Test numuneleri ASTM D638 standardına göre hazırlanmıştır. İlk olarak, 1 cm genişliğinde ve 6 cm boyunda olacak şekilde kesilmiş ve ardından çeneler arası mesafe 4 cm olacak şekilde tutturulmuştur. Hazırlanan her bir numuneden 10'ar test, 5 mm/dk çekme hızında uygulanmıştır.

2.3.5 Spektrofotometrik analizler (Spectrophotometric analysis)

Bu çalışma kapsamında, katkısız ve katkılı epoksi nanokompozit numunelerinin optik özellikleri, spektrofotometre (Shimadzu UV-3600 UV-Vis-NIR) ile incelenmiştir. Spektrofotometrik analizler, 200 nm ile 800 nm arasında 5 nm'lik adımlarla absorbans değerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir.

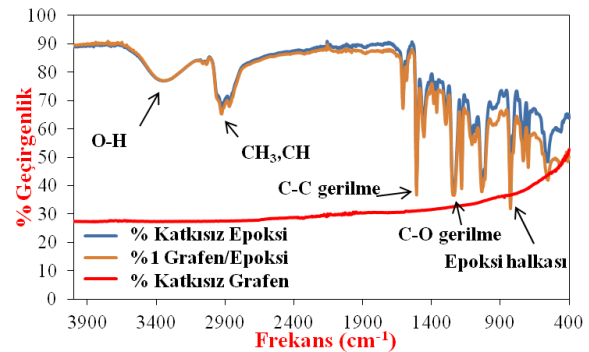
2.3.6 Morfolojik analizler (Morphological analysis)

Çalışmada üretilen katkısız ve katkılı epoksi nanokompozit numunelerinin morfolojik özellik analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM, Carl Zeiss/Gemini 300) ile yapılmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1 FT-IR Analizleri (FT-IR Analysis)

Katkısız epoksi, %1 grafen/epoksi nanokompozit ve grafene ait FT-IR analiz sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.



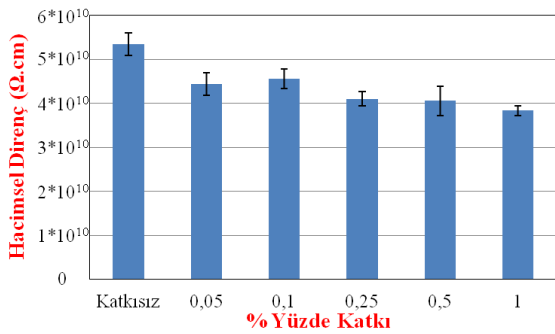
Şekil 2. Katkısız Epoksi, %1 Grafen/epoksi ve Grafene Ait FT-IR Analizleri (FT-IR Analysis of Neat Epoxy, %1 Graphene/epoxy and Graphene).

Epoksi gruplarında, 3445 cm^{-1} (O-H gerilmesi), 2972 ve 2870 cm^{-1} (CH_3 ve CH_2), 915 cm^{-1} (epoksi grup) pikleri gözlenmiştir [36]. Şekil 2'de görüldüğü gibi, spektrumda katkısız grafene ait herhangi bir pik gözlenmemiş ve buna bağlı olarak da epoksi içerisindeki %1 grafen katkısı, katkısız epoksi ile karşılaştırıldığında piklerde herhangi bir farklılık oluşturamamıştır [37, 38].

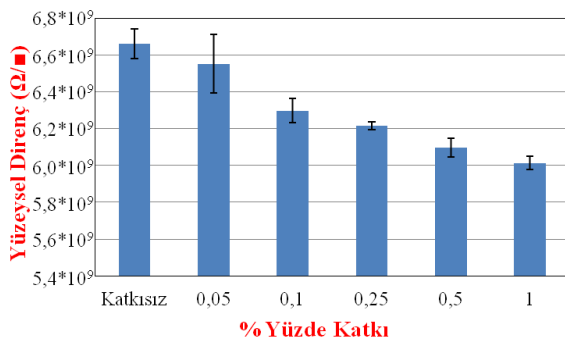
3.2 Elektriksel Direnç Ölçümleri (Electrical Resistivity Measurements)

Grafen, elektriksel iletkenliği yüksek (10^7 S/m) bir malzemedir [39]. Karbon esaslı bu malzeme, epoksi gibi elektriksel iletkenliği düşük ($2,7*10^{-12}$) birçok polimerik malzemeye uygun işlemlerle takviyelendirilerek elektriksel iletkenliklerinde artış sağlanabilmektedir [18, 33, 40-46].

Çalışma kapsamında hazırlanan grafen/epoksi nanokompozitlerin elektriksel iletkenlik değerleri, içerisinde bulunan grafen miktarlarına göre incelenmiştir. Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin hacimsel ve yüzeyel dirençlerine ait grafikler Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Hacimsel Direnç Grafiği (Volumetric Resistance Graph of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).



Şekil 4. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Yüzeysel Direnç Grafiği (Surface Resistance Graph of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).

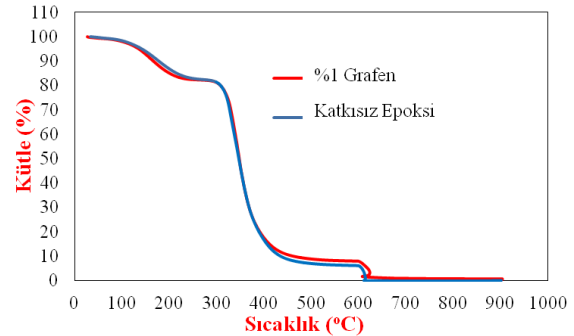
Yapılan bu çalışmada, katkısız epoksilerin hacimsel direnç değeri, $5,348*10^{10}\text{ Ω.cm}$ iken, hacimsel direnç değeri, katkı miktarının artması ile genel olarak azalma

eğiliminde olmuştur ve %1'lik grafen katkısında $3,839*10^{10}\text{ Ω.cm}$ 'ye düşmüştür. Yüzeysel direnç değeri ise, katkısız epoksi numunede $6,660*10^9\text{ Ω/□}$ olarak ölçülmüştür. Grafen katkısının artması ile azalan bir grafik eğrisi göstermiştir ve %1 grafen katkısı yapıldığında, $6,012*10^9\text{ Ω/□}$ olarak ölçülmüştür. %1 oranında grafen katkısı, hacimsel direnç değeri %28,2'lik bir azalmaya neden olmuşken yüzeyel dirençte bu azalma %9,7 civarında olmuştur.

Yüzeysel direnç ölçümlerinde, akım yüzeyde yer alırken, hacimsel direnç ölçümlerinde, akım, ölçümü alınan nanokompozitin içinden geçer. Bu çalışmada, topaklanma eğilimine sahip olan grafene, FT-IR spektrumlarında da görüldüğü üzere herhangi bir yüzey fonksiyonelleştirmesi yapılmamıştır. %0,1 grafen katkılı numunelerin, yüzeyel direnç ölçümünde, grafiğin azalma eğrisine uygun bir değer elde edilirken, hacimsel direnç değerinde beklenmeyen bir artış gözlenmesi, iletken bir malzeme olan grafen tabakalarının epoksi kompozitin içinde bir miktar birleşerek topaklandığını bu nedenle de hacimsel direnci arttırdığını göstermektedir. Literatürde de değinildiği üzere, elde edilen numunelerde, grafen, iç kısımlarda daha fazla bulunmakta, nanokompozit yüzeyinde ise daha az yer almaktadır [47, 48]. Bu durum da yüzey katmanının bir özelliği olan yüzeyel direnç değerlerinde, hacimsel direnç değerlerine göre daha az oranda düşüş elde edilmesine neden olmuştur.

3.3 Termogravimetrik Analizler (Thermogravimetric Analysis)

Bu çalışmada, katkısız epoksi ve %1 grafen-epoksi nanokompozitlerin TGA analizleri Şekil 5'de verilmiştir.



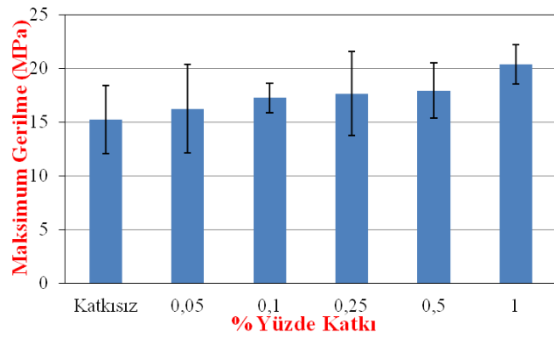
Şekil 5. Katkısız Epoksi ve %1 Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin TGA Analizleri (TGA Analysis of Additive Epoxy and 1% Graphene/Epoxy Nanocomposites).

Literatürde, epoksiye dahil edilen grafenin daha yüksek bir termal kararlılığa sahip olduğu rapor edilmiştir [49]. Grafenin bu yüksek termal kararlılığı sayesinde, birçok uygulamada kullanılmak üzere, polimerik malzemelere takviyelendirilerek bozunma sıcaklıkları artırılmaya çalışılmaktadır [50, 51]. Şekil 5 incelendiğinde, hazırlanan nanokompozitlerde 2 adımlı bozunma olduğu görülmektedir. 30°C ile 200°C arasındaki %15'lik bir ağırlık kaybı, ticari epoksiye ilave edilen ucucu

bileşenlerin (plaktikleştiricilerin) uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Katkısız epoksi ve %1 grafen-epoksi yaklaşık olarak 350°C'de bozunmaya başlamıştır. Ayrıca, ilk bozunma adımında katkısız epoksida, %70'lik bir kütle kaybı görülürken, %1 grafen-epoksida %67'lik bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu kütle farkı, epoksi nanokompozitlerin içerisindeki grafenin varlığına dayanmakta ve nanokompozitlerin bozunmasını yavaşlattığını göstermektedir [51].

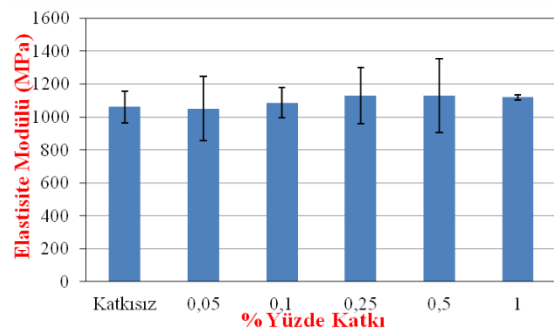
3.4 Mekanik Testler (Mechanical Tests)

Hazırlanan grafen/epoksi nanokompozit numunelerine ait çekme testi sonuçları, maksimum gerilme değerleri ile Şekil 6'da verilmiştir. Burada, görüldüğü üzere, grafen takviyesi ile epoksi kompozitlerin maksimum gerilme değerleri, grafen katkı oranlarına bağlı olarak kademeli bir şekilde artmış ve 15,23 MPa'dan 20,38 MPa'a çıkararak maksimuma (%1 grafen katkısı ile) ulaşmıştır. Benzer şekilde, literatürde de katkısız epoksiye dahil edilen grafen, numunelerin gerilme özelliklerini iyileştirmiştir [52]. %1 oranında grafen katkılı nanokompozitlerin gerilme mukavemeti, katkısız epoksi ile karşılaştırıldığında %33'lük bir artış sağlandığı gözlenmiştir.



Şekil 6. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Maksimum Gerilme Grafiği (Maximum Stress Graph of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).

Katkısız filmler ve grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin elastisite modülü (Young modülü) (MPa) değerlerine ait grafik, Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Elastisite Modülü Grafiği (Elasticity Modulus Graph of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).

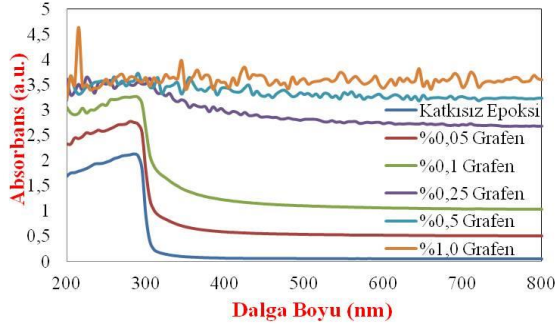
Şekil 7 incelendiğinde, epoksilere farklı oranlarda ilave edilen grafenin, elastisite modülünü arttırdığı gözlenmiştir. Ağırlıkça %0,05 grafen katkılı epoksi kompozitin elastisite modülü, katkısız epoksiye (1061,12 MPa) göre daha düşük bulunmasına rağmen, artırılan grafen miktarına bağlı olarak elastisite modülü belli bir miktarda artış göstermiştir. Ağırlıkça %0,5 grafen ilavesinde (1130,25 MPa), elastisite modülü maksimuma ulaşmıştır. %1 grafen ilavesinde elde edilen elastisite modülü (1119,34 MPa), %0,5 grafen ilavesi ile karşılaştırıldığında daha düşük elde edilmiştir. Epoksi kompozitlerdeki elastisite modülündeki maksimum artış (%7'lik artış), beklenenden daha az olarak gerçekleşmiştir. Termoset bir malzeme olan epoksi içerisinde grafeni dağıtmanın zor olması nedeniyle, epoksi kompozitin bazı bölgelerinde yığılmalara neden olmuş ve buna bağlı olarak da yüksek elastisite modülü artışı sonuçları elde edilemediği düşünülmektedir.

Literatürde de benzer şekilde, grafenin yer yer topraklanması (aglomerasyonu) nedeniyle, grafen takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde, beklenen artışların elde edilemediği belirtilmiştir [53, 54]. Grafen ilavesi %5'in altındayken elastisite modülünün arttığını, %7,5 grafen yüklemesinde ise azaldığını tespit eden çalışmalar da mevcuttur. Ortaya çıkan bu azalma, üretilen malzemenin viskozitesinin artmasıyla dağılımın homojen olarak sağlanamamasına ve buna bağlı olarak da aglomerasyon oluşmasına bağlanmıştır[53].

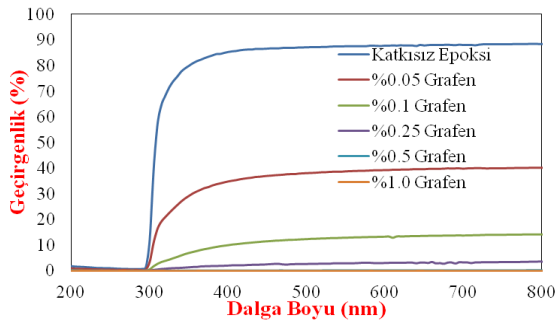
3.5 Spektrofotometrik Analizler

(Spectrophotometric Analysis)

Elde edilen numunelerin optik özellikleri, 200 nm ile 800 nm arasında 5 nm'lik adımlarla absorbans ve geçirgenlik değerlerinin ölçülmesi ile belirlenmiştir. Şekil 8'de katkısız ve grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin absorbans spektrumları gösterilmiştir. Grafen kendi özel yapısından dolayı rengi siyah olan bir malzemedir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, grafen, içerisine eklendiği nanokompozit malzemelerin rengini, katkı oranlarına göre kademeli olarak koyulaştırmaktadır. Renk, şeffaftan açık kahverengiye sonrasında ise daha koyuya (siyah renge) doğru kaymıştır. Grafen katkısız ve grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin 200 nm ile 800nm arasındaki absorbans spektrumları incelendiğinde, içerisindeki grafen miktarı arttıkça absorbans değeri, katkısız epoksi ile karşılaştırıldığında kademeli olarak artmış ve %1 grafen katkılı epoksida maksimuma ulaşmıştır. Ayrıca kullanılan grafen katkısız epoksinin 200-300 nm arasındaki UV bölgede, grafen katkılı nanokompozitlerde olduğu gibi absorbans özelliği olduğu görülmekte, bu da literatürdeki çalışmalar ile örtüşmektedir [55, 56].



Şekil 8. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin Absorbans Spektrumları (Absorbance Spectra of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).

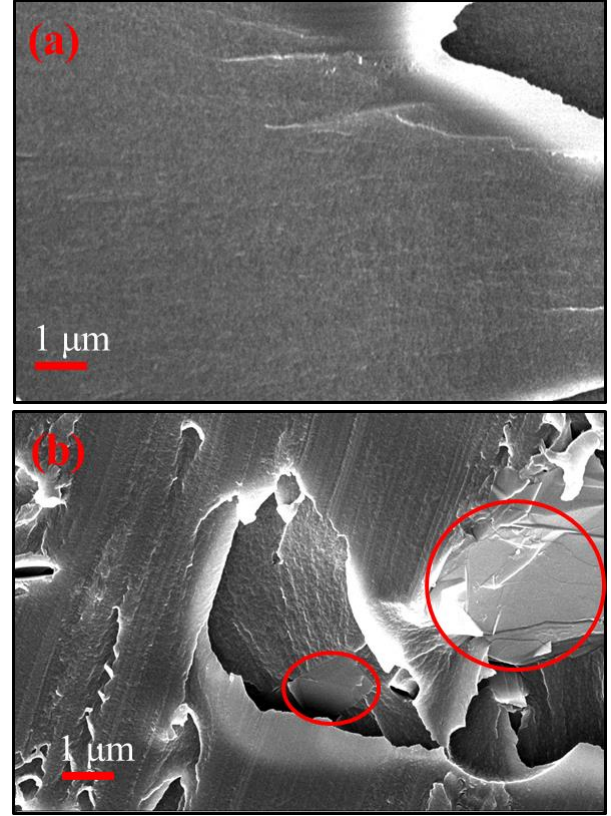


Şekil 9. Katkısız ve Grafen Katkılı Epoksi Nanokompozitlerin UV-Geçirgenlik Spektrumları (UV-Permeability Spectra of Neat and Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposites).

Şekil 9'da katkısız ve grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin 200 nm ile 800 nm arasındaki UV-görünür bölge geçirgenlik spektrumları verilmiştir. UV-görünür bölge geçirgenlik değerleri, katkısız epoksi ile karşılaştırıldığında, içerisindeki grafen miktarının artmasına bağlı olarak UV-görünür bölge geçirgenlik değerinin katkısız epoksi ile karşılaştırıldığında kademeli olarak azaldığı ve %1 grafen içeren epoksidede en düşük değere ulaştığı saptanmıştır.

3.6 Morfolojik Analizler (Morphological Analysis)

Elde edilen numunelerdeki grafen katkılarının tespiti taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.



Şekil 10. (a) Katkısız Epoksi (5 kx), (b) %1 Grafen Katkılı Epoksinin (10 kx) SEM Görüntüleri (SEM images of (a) Neat epoxy (5kx), (b) 1% Graphene Reinforced Epoxy Nanocomposite (10 kx)).

Şekil 10'da katkısız epoksi ve %1 grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. %1 grafen katkılı epoksinin SEM görüntülerinde, katkısız epoksinin SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında, grafenin varlığını gösteren literatürdeki çalışmalara benzer olarak, bölgesel yapılar saptanmıştır [29, 30, 57].

Nano incelikteki ve en ve boyları birkaç mikrometre olan grafen parçacıkları, resimlerde görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, ultrasonik homojenizatör yardımı ile homojen dağıtılmaya çalışılan grafen/epoksi kompozitlerin SEM resimleri incelendiğinde, grafenin kompozit içerisindeki varlığı tespit edilmiştir [54].

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında elde edilen grafen/epoksi nanokompozitlerin yapısal, termal, mekanik, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri, FT-IR, TGA, mekanik test, SEM görüntüleri, UV-Vis spektrofotometresi ve elektriksel direnç ölçümleri ile incelenmiştir.

Grafen katkılı epoksi nanokompozitlerin FT-IR spektrumları incelendiğinde, grafenden kaynaklanan net bir absorpsiyon piki gözlenmemiştir. Grafenin, epoksiye ilave edilmesi ile elde edilen nanokompozitlerin ışık geçirgenliği katkı oranının artması ile azalmış, ışık absorpsiyonu ise katkı oranının artmasıyla artmıştır.

Nanokompozitlerin termal analiz sonucuna göre, ilk bozunma adımında katkısız epoksida, daha fazla bir kütle kaybı görülürken, %1 katkılı grafen-epoksida daha düşük bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu kütle kaybı farkı, epoksi nanokompozitlerin içerisinde grafenin varlığına dayanmaktadır ve bu sonuçlar, literatürde de belirtilen grafenin, nanokompozitlerin termal bozunmasını yavaşlattığı sonucunu desteklemiştir. SEM resimlerinde, grafenin nanokompozitlerin içerisinde yer aldığı görsel olarak tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, sonuçlar incelendiğinde, literatürde de değinilen, grafenin kendi iç özelliklerinden kaynaklanan topaklanma eğilimi ve termoset bir malzeme olan epoksinin viskozitesinin yüksek olması nedeniyle, grafenin yüksek katkı oranlarında, epoksi içerisinde tamamen homojen bir şekilde karıştırılmadığı ve yer yer grafen yığılmaları meydana geldiği tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, katkısız epoksiye göre, grafen/epoksi nanokompozitlerin mekanik test sonuçlarında (elastisite modülü ve maksimum gerilme), literatürde de değinildiği üzere, beklenenden daha az ancak yine de belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin maksimum gerilme değeri, %1'lik grafen katkısında, katkısız epoksiye göre %33,84 oranında artarak 20,38 MPa olarak elde edilmiştir. Ortalama elastisite modülü değeri, %6,5'lik bir artışla, 1061 MPa'dan 1130,25 MPa'a (%0,5 grafen ilavesinde) çıkmıştır. Bunun yanında, grafenin epoksiye ilave edilmesi ile elektriksel iletkenliğin de önemli ölçüde arttığı değerlendirilmiştir. %1 oranında grafen katkısı, epoksi nanokompozitlerin yüzeysel direncinde %9,7 ve hacimsel direnç değerinde %28,2'lik bir azalma sağlamıştır. Elde edilen nanokompozit filmler, sağladığı iyileştirilmiş elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikler sayesinde kompozit sektöründe farklı uygulamalarda kullanılabilir.

SİMGELER (Icons)

I: Akım

ρ_v : Hacim Direnci

σ : İletkenlik

t: Kalınlık

V: Uygulanan Gerilim

ρ_s : Yüzey Direnci

KISALTMALAR (Abbreviations)

FT-IR: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

TGA: Termogravimetrik analiz

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hazal YILMAZ DOĞAN: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Yasin ALTIN: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Ayşe BEDELOĞLU: Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pissis, P., "Thermoset nanocomposites for engineering applications", *Smithers Rapra Publishing*, Shawbury, UK., (2007).
- [2] Ku, H., H. Wang, N. Pattarachaiyakoop, and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites", *Composites Part B-Engineering*, 42 (4): 856-873, (2011).
- [3] Garg, P., B.P. Singh, G. Kumar, T. Gupta, I. Pandey, R. Seth, R. Tandon, and R.B. Mathur, "Effect of dispersion conditions on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes based epoxy resin composites", *Journal of Polymer Research*, 18 (6): 1397-1407, (2011).
- [4] Yang, C.C., F.C. Chang, Y.Z. Wang, C.M. Chan, C.L. Lin, and W.Y. Chen, "Novel nanocomposite of epoxy resin by introduced reactive and nanoporous material", *Journal of Polymer Research*, 14 (6): 431-439, (2007).
- [5] Chozhan, C.K., M. Alagar, R.J. Sharmila, and P. Gnanasundaram, "Thermo mechanical behaviour of unsaturated polyester toughened epoxy-clay hybrid nanocomposites", *Journal of Polymer Research*, 14 (4): 319-328, (2007).
- [6] Wang, X., Y. Hu, L. Song, W.Y. Xing, H.D.A. Lu, P. Lv, and G.X. Jie, "Flame retardancy and thermal degradation mechanism of epoxy resin composites based on a DOPO substituted organophosphorus oligomer", *Polymer*, 51 (11): 2435-2445, (2010).
- [7] Karayannidou, E.G., D.S. Achilias, and I.D. Sideridou, "Cure kinetics of epoxy-amine resins used in the restoration of works of art from glass or ceramic", *European Polymer Journal*, 42 (12): 3311-3323, (2006).

- [8] Rokicki, G. and C. Wojciechowski, "Epoxy-Resin Modified by Aliphatic Cyclic Carbonates", *Journal of Applied Polymer Science*, 41 (3-4): 647-659, (1990).
- [9] Chandrasekaran, S., N. Sato, F. Tolle, R. Mulhaupt, B. Fiedler, and K. Schulte, "Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites", *Composites Science and Technology*, 97: 90-99, (2014).
- [10] Kasar, A., G.P. Xiong, and P.L. Menezes, "Graphene-Reinforced Metal and Polymer Matrix Composites", *Jom*, 70 (6): 829-836, (2018).
- [11] Sengupta, R., M. Bhattacharya, S. Bandyopadhyay, and A.K. Bhowmick, "A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites", *Progress in Polymer Science*, 36 (5): 638-670, (2011).
- [12] Sadasivuni, K.K., D. Ponnamma, J. Kim, and S. Thomas, "Graphene-based polymer nanocomposites in electronics", *Springer*, (2015).
- [13] Zhao, X., Q. Zhang, D. Chen, and P. Lu, "Enhanced mechanical properties of graphene-based poly (vinyl alcohol) composites", *Macromolecules*, 43 (5): 2357-2363, (2010).
- [14] Altin, Y., M. Tas, İ. Borazan, A. Demir, and A. Bedeloglu, "Solution-processed transparent conducting electrodes with graphene, silver nanowires and PEDOT: PSS as alternative to ITO", *Surface and Coatings Technology*, 302: 75-81, (2016).
- [15] Tas, M., Y. Altin, and A.C. Bedeloglu, "Reduction of graphene oxide thin films using a stepwise thermal annealing assisted by l-ascorbic acid", *Diamond and Related Materials*, 92: 242-247, (2019).
- [16] Guo, Z., L. Song, C.G. Boay, Z. Li, Y. Li, and Z. Wang, "A new multiscale numerical characterization of mechanical properties of graphene-reinforced polymer-matrix composites", *Composite Structures*, 199: 1-9, (2018).
- [17] An, J.E. and Y.G. Jeong, "Structure and electric heating performance of graphene/epoxy composite films", *European Polymer Journal*, 49 (6): 1322-1330, (2013).
- [18] Tang, L.C., Y.J. Wan, D. Yan, Y.B. Pei, L. Zhao, Y.B. Li, L.B. Wu, J.X. Jiang, and G.Q. Lai, "The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites", *Carbon*, 60: 16-27, (2013).
- [19] Wajid, A.S., H.S.T. Ahmed, S. Das, F. Irin, A.F. Jankowski, and M.J. Green, "High-Performance Pristine Graphene/Epoxy Composites With Enhanced Mechanical and Electrical Properties", *Macromolecular Materials and Engineering*, 298 (3): 339-347, (2013).
- [20] Naebe, M., J. Wang, A. Amini, H. Khayyam, N. Hameed, L.H. Li, Y. Chen, and B. Fox, "Mechanical Property and Structure of Covalent Functionalised Graphene/Epoxy Nanocomposites", *Scientific Reports*, 4: 4375-4381, (2014).
- [21] Wan, Y.J., L.C. Tang, D. Yan, L. Zhao, Y.B. Li, L.B. Wu, J.X. Jiang, and G.Q. Lai, "Improved dispersion and interface in the graphene/epoxy composites via a facile surfactant-assisted process", *Composites Science and Technology*, 82: 60-68, (2013).
- [22] Chatterjee, S., J.W. Wang, W.S. Kuo, N.H. Tai, C. Salzmann, W.L. Li, R. Hollertz, F.A. Nuesch, and B.T.T. Chu, "Mechanical reinforcement and thermal conductivity in expanded graphene nanoplatelets reinforced epoxy composites", *Chemical Physics Letters*, 531: 6-10, (2012).
- [23] Pokharel, P. and Q.-T. Truong, "Multi-step microwave reduction of graphite oxide and its use in the formation of electrically conductive graphene/epoxy composites", *Composites Part B: Engineering*, 64: 187-193, (2014).
- [24] King, J.A., D.R. Klimek, I. Miskioglu, and G.M. Odegard, "Mechanical properties of graphene nanoplatelet/epoxy composites", *Journal of Composite Materials*, 49 (6): 659-668, (2015).
- [25] Prolongo, S.G., R. Moriche, A. Jimenez-Suarez, M. Sanchez, and A. Urena, "Advantages and disadvantages of the addition of graphene nanoplatelets to epoxy resins", *European Polymer Journal*, 61: 206-214, (2014).
- [26] Shiu, S.C. and J.L. Tsai, "Characterizing thermal and mechanical properties of graphene/epoxy nanocomposites", *Composites Part B-Engineering*, 56: 691-697, (2014).
- [27] Yu, H., Z. Tong, P. Chen, A. Cai, and F. Qin, "Effects of different parameters on thermal and mechanical properties of aminated graphene/epoxy nanocomposites connected by covalent: A molecular dynamics study", *Current Applied Physics*, 20 (4): 510-518, (2020).
- [28] Yu, W., L. Sisi, Y. Haiyan, and L. Jie, "Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: a review", *RSC Advances*, 10 (26): 15328-15345, (2020).
- [29] Duan, W., Y. Chen, J. Ma, W. Wang, J. Cheng, and J. Zhang, "High-performance graphene reinforced epoxy nanocomposites using benzyl glycidyl ether as a dispersant and surface modifier", *Composites Part B: Engineering*, 189: 107878, (2020).
- [30] Wang, F., L.T. Drzal, Y. Qin, and Z. Huang, "Enhancement of fracture toughness, mechanical and thermal properties of rubber/epoxy composites by incorporation of graphene nanoplatelets", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87: 10-22, (2016).
- [31] Sreeprasad, T. and V. Berry, "How do the electrical properties of graphene change with its functionalization?", *Small*, 9 (3): 341-350, (2013).
- [32] Chun, W.W., T.P. Leng, A.F. Osman, and Y.C. Keat, "Mechanical Properties and Morphology of Epoxy/Graphene Nanocomposite Using Bath Sonication and Tip Sonication", *Solid State Phenomena*, 280: 258-263, (2018).
- [33] Imran, K.A. and K.N. Shivakumar, "Enhancement of electrical conductivity of epoxy using graphene and determination of their thermo-mechanical properties", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37 (2): 118-133, (2018).
- [34] Noroozi, M., A. Zakaria, S. Radiman, and Z.A. Wahab, "Environmental synthesis of few layers graphene sheets using ultrasonic exfoliation with enhanced electrical and thermal properties", *PloS one*, 11 (4): e0152699, (2016).
- [35] Cheng, K., T. Cheng, K. Lee, T. Ueng, and W. Hsing, "Effects of yarn constitutions and fabric specifications on electrical properties of hybrid woven fabrics", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34 (10): 971-978, (2003).
- [36] Cakić, S.M., I.S. Ristić, V.M. Jašo, R.Ž. Radičević, O.Z. Ilić, and J.K. Simendić, "Investigation of the curing kinetics of alkyd-melamine-epoxy resin system", *Progress in Organic Coatings*, 73 (4): 415-424, (2012).

- [37] Thema, F., M. Moloto, E. Dikio, N. Nyangiwe, L. Kotsedi, M. Maaza, and M. Khenfouch, "Synthesis and characterization of graphene thin films by chemical reduction of exfoliated and intercalated graphite oxide", *Journal of chemistry*, 2013: 1-7, (2013).
- [38] Tas, M., Y. Altin, and A. Bedeloglu, "Graphene and graphene oxide-coated polyamide monofilament yarns for fiber-shaped flexible electrodes", *The journal of the Textile Institute*, 110 (1): 67-73, (2019).
- [39] Bourgeat-Lami, E., J. Faucheu, and A. Noel, "Latex routes to graphene-based nanocomposites", *Polymer Chemistry*, 6 (30): 5323-5357, (2015).
- [40] Wang, Z., G. Wei, and G.L. Zhao, "Enhanced electromagnetic wave shielding effectiveness of Fe doped carbon nanotubes/epoxy composites", *Applied Physics Letters*, 103 (18): 183109-183114, (2013).
- [41] Marra, F., A.G. D'Aloia, A. Tamburrano, I.M. Ochando, G. De Bellis, G. Ellis, and M.S. Sarto, "Electromagnetic and dynamic mechanical properties of epoxy and vinyl ester-based composites filled with graphene nanoplatelets", *Polymers*, 8 (8): 272-289, (2016).
- [42] Moosa, A.A., A.R. SA, and M.N. Ibrahim, "Mechanical and electrical properties of graphene nanoplates and carbon-nanotubes hybrid epoxy nanocomposites", *American Journal of Materials Science*, 6 (6): 157-165, (2016).
- [43] Hao, Y., M. Tian, H. Zhao, L. Qu, S. Zhu, X. Zhang, S. Chen, K. Wang, and J. Ran, "High efficiency electrothermal graphene/tourmaline composite fabric joule heater with durable abrasion resistance via a spray coating route", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57 (40): 13437-13448, (2018).
- [44] Moghimian, N., S. Saeidlou, H. Lentzakis, G.F. Rosi, N. Song, and É. David, "Electrical conductivity of commercial graphene polyethylene nanocomposites", *17th International Conference on Nanotechnology*, USA, 757-761, (2017).
- [45] Galpaya, D., M. Wang, M. Liu, N. Motta, E.R. Waclawik, and C. Yan, "Recent advances in fabrication and characterization of graphene-polymer nanocomposites", *Graphene*, 1 (2): 30-49, (2012).
- [46] UYSAL, A. and E. ALTAN, "Karbon Siyahı Takviyeli Elektriği İleten Polipropilen Kompozite Delik Delinmesinde İşlem Parametrelerinin İncelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 18 (4): 241-249, (2015).
- [47] Kim, H., A.A. Abdala, and C.W. Macosko, "Graphene/polymer nanocomposites", *Macromolecules*, 43 (16): 6515-6530, (2010).
- [48] Potts, J.R., D.R. Dreyer, C.W. Bielawski, and R.S. Ruoff, "Graphene-based polymer nanocomposites", *Polymer*, 52 (1): 5-25, (2011).
- [49] Wei, J., T. Vo, and F. Inam, "Epoxy/graphene nanocomposites—processing and properties: a review", *RSC Advances*, 5 (90): 73510-73524, (2015).
- [50] Alhumade, H., A. Yu, A. Elkamel, L. Simon, and A. Abdala, "Enhanced protective properties and UV stability of epoxy/graphene nanocomposite coating on stainless steel", *Express Polymer Letters*, 10 (12): 1034-1046, (2016).
- [51] Teng, C.-C., C.-C.M. Ma, C.-H. Lu, S.-Y. Yang, S.-H. Lee, M.-C. Hsiao, M.-Y. Yen, K.-C. Chiou, and T.-M. Lee, "Thermal conductivity and structure of non-covalent functionalized graphene/epoxy composites", *Carbon*, 49 (15): 5107-5116, (2011).
- [52] Malik, P., Bhasha, and P. Jain, "Influence of Surface modified Graphene Oxide on Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin", *Oriental Journal of Chemistry*, 34 (3): 1597-1603, (2018).
- [53] Manta, A., M. Gresil, and C. Soutis, "Tensile and flexural behaviour of a graphene/epoxy composite: experiments and simulation", *Journal of Physics: Materials*, 3 (1): 014006, (2019).
- [54] Saw, W.S. and M. Mariatti, "Properties of synthetic diamond and graphene nanoplatelet-filled epoxy thin film composites for electronic applications", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 23 (4): 817-824, (2012).
- [55] Devangamath, S.S. and B. Lobo, "Optical parameters of epoxy-CoSO₄. 7H₂O polymer hybrid material", *Materials Research Innovations*, 24 (3): 152-160, (2020).
- [56] Kasim, F., M. Mahdi, J. Hassan, S. Al-Ani, and S. Kasim, "Preparation and optical properties of CdS/Epoxy nanocomposites", *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 5: 57-66, (2012).
- [57] Zakaria, M.R., M.H.A. Kudus, H.M. Akil, and M.Z.M. Thirmizir, "Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties", *Composites Part B: Engineering*, 119: 57-66, (2017).